

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
“ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ”

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ
по курсу “Основы научных исследований”
для студентов специальности

141 “Электроэнергетика, электротехника и электромеханика”,
специализаций 141.07 “Электрические аппараты” и
141.08 “Электробытовая техника” всех форм обучения,
в том числе для иностранных студентов

Утверждено
редакционно-издательским
советом университета,
протокол № 2 от 24. 05. 2018 г.

Харьков
НТУ “ХПИ”

2018

Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу “Основы научных исследований” для студентов специальности 141 “Электроэнергетика, электротехника и электромеханика”, специализаций 141.07 “Электрические аппараты” и 141.08 “Электробытовая техника” всех форм обучения, в том числе для иностранных студент / сост. Ю. С. Грищук. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2018. – 32 с.

Составитель Ю. С. Грищук

Рецензент М. Г. Пантелят

Кафедра электрических аппаратов

ВСТУПЛЕНИЕ

В электрических аппаратах (ЭА) и электробытовой технике (ЭБТ) часто возникают задачи, в которых исследуемый объект не может успешно анализироваться и синтезироваться на основе классических методов с использованием однофакторных экспериментов.

Решение таких задач возможно на основе многофакторных научных исследований, современных методов их проведения, использующих теорию планирования эксперимента и математическую статистику.

Применение этих методов дает возможность, широко используя современную микропроцессорную и вычислительную технику, получать многофакторные математические модели, исследуемых сложных объектов или процессов, позволяющие достаточно точно и адекватно их описывать.

Наличие таких моделей заменяет дальнейшие экспериментальные исследования объектов или процессов анализом их математических моделей при решении поставленных конкретных задач по исследованию ЭА и ЭБТ и выбору оптимальных параметров их деталей узлов и систем.

Это позволяет обеспечить нахождение таких условий и правил проведения многофакторных экспериментов, при которых удаётся получить надёжную и достоверную информацию, об исследуемых объектах и процессах, в виде многофакторных математических моделей (МММ).

Применение таких моделей позволяет существенно снизить материальные и трудовые затраты при проведении испытаний или исследований ЭА и ЭБТ, сократить сроки их проведения, а также существенно повысить их достоверность и экономическую эффективность.

Целью данных методических указаний является оказание помощи студентам в углублении и закреплении знаний при изучении курса “Основы научных исследований”, а также в приобретении студентами практических навыков и умений проведения многофакторных экспериментальных исследований и построения на их основе многофакторных математических моделей первого и второго порядка, при исследовании ЭА, ЭБТ и других электромеханических устройств, систем и объектов.

1. Лабораторная работа 1

ПОСТРОЕНИЕ ПЛАНА МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПФЕ2^м И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

Цель работы – ознакомление с основами и изучение методики планирования многофакторных экспериментов, обретение студентами практических навыков проведения на этой основе экспериментальных исследований электрических аппаратов, умение строить математические модели, первого порядка и анализировать физические процессы, которые происходят в электрических аппаратах при разных режимах работы.

Порядок подготовки к работе

Изучить:

- 1) рекомендованную литературу [1 – 3];
- 2) описание лабораторной установки;
- 3) методические указания к выполнению лабораторной работы.

Описание лабораторной установки

В состав лабораторной установки входят экспериментальный стенд для проведения многофакторных коммутационных исследований электрических аппаратов и получения результатов экспериментов в числовом виде или в виде осциллограмм и ПЭВМ для обработки результатов.

В случае необходимости преподаватель может вносить изменения и для обработки результатов предоставлять студентам осциллограммы.

Схема экспериментального стенда для коммутационных исследований электрических аппаратов приведена на рис. 1.1 и включает в себя: ударный генератор постоянного тока (УГ), который приводится в движение от асинхронного двигателя (АД); защитный выключатель (ЗВ), который обеспечивает защиту установки от аварийного короткого замыкания, включающий аппарат (ВА); макет исследуемого электрического аппарата (МА); регулирующие индуктивность (L) и сопротивление (R); электромеханический или электронный осциллограф (ЭО); систему и пульт электронного управления (СПЭУ).

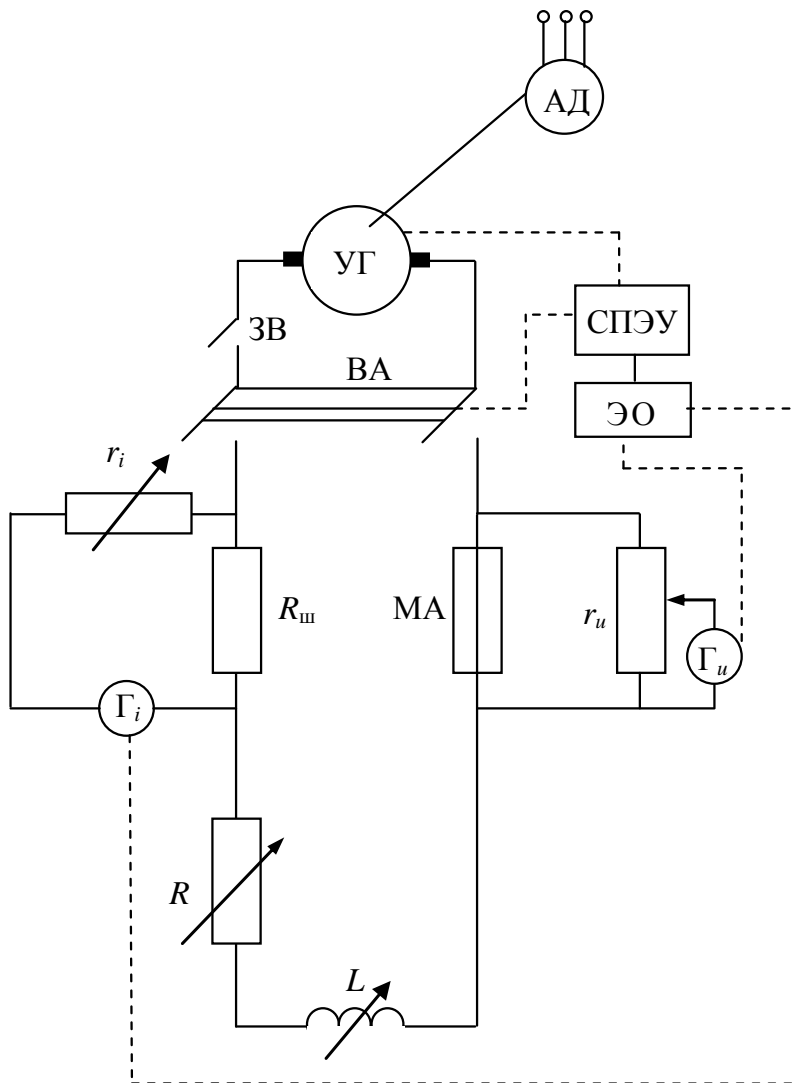


Рисунок 1.1 – Схема экспериментального стенда для коммутационных исследований

Основные сведения

Математические методы планирования эксперимента могут применяться для решения многих задач, в том числе и для построения многофакторных математических моделей (ММ) разных порядков. Для построения математической модели первого порядка в виде отрезка степенного ряда (полинома) целесообразно использовать полный факторный эксперимент ПФЭ 2^m , в котором факторы x_j изменяются на двух уровнях: $x_{j\min} \leftrightarrow (-1)$ и $x_{j\max} \leftrightarrow (+1)$. Ниже, на рис.1.2, представлена

кибернетическая схема исследуемого объекта (ИО) при количестве (числе) факторов $m = 2$ и количестве функций отклика $k = 1$.

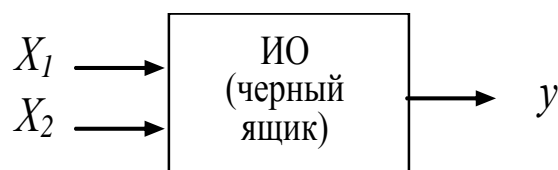


Рисунок 1.2– Кибернетическая схема исследуемого объекта

Математическая модель такого объекта исследования имеет вид

$$y = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2, \quad (1.1)$$

где X_1, X_2 – факторы; y – функция отклика; B_0, B_1, B_2 – неизвестные коэффициенты.

План эксперимента при этом должен отвечать всем требованиям теории планирования многофакторного эксперимента. Факторы в плане должны быть представлены в кодированном виде.

Тогда поисковая математическая модель в кодированном виде будет выглядеть так:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2, \quad (1.2)$$

где x_1, x_2 – кодированные значения соответствующих натуральных факторов X_1 и X_2 .

Для вычисления или нахождения неизвестных коэффициентов в общем виде используется план полного факторного эксперимента ПФЭ 2^m , который должен отвечать требованиям теории планирования эксперимента: симметричности, ортогональности и нормированию. Неизвестные коэффициенты b_j в этом случае будут вычисляться по формуле

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N y_{ei} x_{ji}}{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2}, \quad (1.3)$$

где y_{ei} – среднее арифметическое, т.е. числовая величина экспериментального значения функции отклика в i -м опыте, т.е. в i -й строке плана; x_{ji} – кодированное значение j -го фактора в i -м опыте или в i -й строке.

При коэффициенте дублирования опытов $\kappa_d = 3$, y_{ei} находим за формулой

$$y_{ei} = \frac{y_{ei}' + y_{ei}'' + y_{ei}'''}{3}. \quad (1.4)$$

Например, если взять за исследуемый аппарат быстродействующий предохранитель или автоматический выключатель и выбрать число факторов $m = 2$, то решение этой задачи может быть выполнено таким образом.

Модель в кодированном виде имеет вид

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2. \quad (1.5)$$

Для определения неизвестных коэффициентов b_0, b_1, b_2 строим план. Для этого находим число опытов по формуле

$$N = 2^m = 2^2 = 4. \quad (1.6)$$

Выбираем факторы: $x_1 \leftrightarrow I, A$, $x_2 \leftrightarrow U, B$.

Определяем их граничные уровни и соответственно следующие кодированные значения:

$$\begin{aligned}
x_{1min} &= 10 \text{ кА} \leftrightarrow (-1); & x_{2min} &= 220 \text{ В} \leftrightarrow (-1); \\
x_{1m} &= 70 \text{ кА} \leftrightarrow (+1); & x_{2max} &= 660 \text{ В} \leftrightarrow (+1); \\
x_{1cp} &= \frac{70 + 10}{2} = 40 \text{ кА} \leftrightarrow (0); & x_{2cp} &= \frac{220 + 660}{2} = 440 \text{ В} \leftrightarrow (0).
\end{aligned}$$

Согласно правилу построения (столбцы $x_0 = +1$ во всех строках, а в строках x_j знак (+) чередуется со знаком (–) через 2^{j-1} строки) составляется план ПФЭ 2^m (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – План двухфакторного эксперимента первого порядка

	Условия эксперимента			Результаты эксперимента				Результаты расчетов		
	$j = 0$	$j = 1$	$j = 2$							
i	x_0	x_1	x_2	y_{ei}'	y_{ei}''	y_{ei}'''	y_{ei}	y_{pi}	$y_{ei} - y_{pi}$	$\Delta\% = \frac{y_{ei} - y_{pi}}{y_{ei}} \cdot 100\%$
1	+1	+1	+1							
2	+1	–1	+1							
3	+1	+1	–1							
4	+1	–1	–1							

Примечание. В табл.1 приняты следующие обозначения: i – номер строки; j – номер столбца; y_{ei} и y_{pi} – экспериментальное и соответственно расчетное значение функции отклика в i -том опыте (т.е., i -той строке плана эксперимента).

Порядок выполнения

Задача 1.1 Составить кибернетическую схему исследуемого электрического аппарата, выбрать факторы и функцию отклика, определить предельные величины факторов и соответствующие им кодированные значения. Число факторов m и вид электрического аппарата задается соответственно порядковому номеру по журналу, согласно табл. 1.2 и 1.3. Число факторов и электрический аппарат могут быть заменены другим по желанию студента, при необходимом обосновании и с разрешения преподавателя.

Таблица 1.2 – Варианты данных

Вид электрического аппарата	Быстродействующий предохранитель							Автоматический выключатель						
№ по журналу	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Число факторов	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

Таблица 1.3 – Варианты данных

Вид электрического аппарата.	Реле времени электромагнитное					Магнитный пускатель, контактор						
№ по журналу	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
Число факторов	3	4	5	6	7	3	4	5	6	7	8	

Задача 1.2. Выбрать вид искомой интерполяционной формулы (математической модели) первого порядка, составить план ПФЭ^m для проведения эксперимента и определить неизвестные коэффициенты в общем виде.

Задача 1.3. Составить алгоритм и программу определения числовых величин коэффициентов, построения математической модели (ММ) первого порядка и расчетных значений функции отклика y_{pi} , расчета отклонений, y_{ei} - y_{pi} и относительных отклонений в процентах, $\Delta\%$, между экспериментальными, y_{ei} и расчетными, y_{pi} функциями отклика на языках C++, системы MAPLE или др. *Пример построения алгоритма* приведен в [1, приложение 1, рис. Д 1.1], а принятые нами в алгоритмах обозначения в приложении 2. *Пример построения плана эксперимента* и расчётов коэффициентов ММ первого порядка, расчетных значений функций отклика y_{pi} , отклонений между функциями отклика ($y_{ei} - y_{pi}$) и относительных отклонений в процентах, $\Delta\%$, приведен в приложении 3 и в [1, приложение 1, пример Д 1.1].

Задача 1.4. На основе экспериментальных значений функций отклика y_{ei} , приведенных в приложении 1, табл. П 1.1 и согласно заданному

преподавателем варианту в лабораторной работе, вычислить коэффициенты полинома, расчётные значения функции отклика y_{pi} , отклонения и относительные отклонения в процентах между функциями отклика y_{ei} и y_{pi} .

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема коммутационных исследований электрических аппаратов на постоянном токе, осциллограммы.
3. Алгоритм, программа и план эксперимента.
4. Результаты расчетов коэффициентов и интерполяционные формулы (математические модели).
5. Анализ математической модели и выводы.

Контрольные вопросы

1. Чем отличаются многофакторные планированные эксперименты от традиционных, однофакторных?
2. Что такое планирование эксперимента?
3. Какие объекты целесообразно исследовать на основе планированных многофакторных экспериментов?
4. Какие требования предъявляются к объектам исследования, факторам, функциям отклика, математическим моделям согласно теории планирования эксперимента?
5. Что представляет собой план многофакторного эксперимента и какие его основные особенности? Приведите примеры.
6. Какие виды искомых математических моделей используются в планированных экспериментах?
7. Какие критерии аппроксимации целесообразно использовать при построении многофакторных интерполяционных формул (математических моделей)?
8. С какой целью и как проводится кодирование факторов?
9. Суть метода наименьших квадратов.
10. Как составляется план многофакторного эксперимента ПФЭ 2^m ? Приведите примеры для $m = 3$ и $m = 5$.

2. Лабораторная работа 2

ПОСТРОЕНИЕ ПЛАНОВ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПЕРВОГО ПОРЯДКА С НЕЛИНЕЙНОСТЯМИ

Цель работы – научиться строить математические модели первого порядка с учетом нелинейностей на основе плана полного факторного эксперимента первого порядка.

Порядок подготовки к работе

Изучить:

- 1) рекомендованную литературу [1 – 3];
- 2) методические указания к выполнению лабораторной работы.

Перечень используемого оборудования

Лабораторный стенд и ПЭВМ.

Основные сведения

Желание минимизировать число опытов в многофакторном эксперименте при построении математической модели первого порядка и необходимость повышения степени ее адекватности приводят к применению математической модели первого порядка с учетом нелинейности. Для двух факторов, т.е. когда $m = 2$, математическая модель первого порядка с нелинейностью имеет вид

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 \quad . \quad (2.1)$$

Неизвестным в ней, кроме коэффициентов b_0, b_1, b_2 , будет и коэффициент b_{12} . Для их нахождения используем план ПФЭ^{2^m}, который модифицируем путем добавки расчетного столбца для фиктивного фактора $x_3 = x_1 x_2$. Тогда коэффициент $b_3 = b_{12}$ будет определяться по общей формуле.

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^n y_{ei} x_{ji}}{\sum_{i=1}^n x_{ji}^2} \quad . \quad (2.2)$$

Число опытов в ПФЭ 2^m определится как

$$N = 2^m = 2^2 = 4. \quad (2.3)$$

План такого эксперимента приведен в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – План первого порядка с нелинейностью x_1x_2

i	x_0	x_1	x_2	$x_1x_2 = x_3$	y_{ei}
1	+1	+1	+1	+1	y_{e1}
2	+1	-1	+1	-1	y_{e2}
3	+1	+1	-1	-1	y_{e3}
4	+1	-1	-1	+1	y_{e4}

При $m = 3$ и больше в математическую модель первого порядка с учетом нелинейности необходимо включить все возможные комбинации произведений парного взаимодействия факторов, тройного, четвертного и т.п. (x_1x_2 , x_1x_3 , x_2x_3 , $x_1x_2x_3$ и т.д.). Для этого в плане достраиваются соответствующие столбцы, которые позволяют определить неизвестные коэффициенты b_{12} , b_{13} , b_{23} , b_{123} и т.д. по той же общей формуле (2.2).

Порядок выполнения

Задача 2.1. Согласно вариантам, указанным в лабораторной работе №1, по заданному количеству факторов m записать вид искомой математической модели первого порядка с учетом нелинейностей.

Для определения неизвестных коэффициентов при x_1x_2 , x_1x_3 , x_2x_3 , $x_1x_2x_3$ необходимо достроить дополнительно к плану ПФЭ 2^m соответствующие столбцы.

Задача 2.2. Разработать алгоритм и программу для расчета неизвестных коэффициентов расчетных значений функции отклика, величины отклонения и относительного отклонения в процентах, $\Delta\%$, между экспериментальными и расчетными значениями функций отклика.

Пример построения алгоритма приведен в [1, приложение 1, рис. Д 1.2].

Задача 2.3. На основе экспериментальных значений функций отклика, приведенных в приложении 1, табл. П 1.1 и согласно заданному преподавателем варианту в лабораторной работе 1, вычислить коэффициенты полинома, расчетные значения функции отклика, величины отклонений и относительных отклонений в процентах, $\Delta\%$, между экспериментальными и расчетными значениями функций отклика.

Пример построения плана эксперимента, результатов расчета коэффициентов математической модели первого порядка с учетом нелинейностей, определения расчетных значений функции отклика, y_{pi} , величины отклонения и относительного отклонения в процентах, $\Delta\%$, между экспериментальными и расчетными значениями функций отклика приведен в [1, приложение 1, пример Д 1.2].

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Искомая математическая модель с нелинейностями в общем виде и достроенный план эксперимента.
3. Алгоритм расчета коэффициентов математической модели с нелинейностями, расчетных значений функции отклика, величин отклонений и относительных отклонений в процентах, $\Delta\%$.
4. Результаты расчета и математическая модель с учетом нелинейностей и ее анализ.

Контрольные вопросы

1. Какой общий вид имеют математические модели с учетом нелинейностей для числа факторов $m = 4, 5, 6$ и для чего их строят?
2. Как достраивается план эксперимента при нахождении коэффициентов при нелинейных членах?
3. Как рассчитываются неизвестные коэффициенты?
4. Как строится алгоритм и программа расчета коэффициентов?
5. Каким условиям должен отвечать план эксперимента, факторы функции отклика, математическая модель и исследуемый объект?
6. Куда и как вводятся и для чего применяются фиктивные факторы?

3. Лабораторная работа 3

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ДРОБНЫХ ПЛАНОВ ДФЭ 2^{m-q}

Цель работы – ознакомиться с методикой построения дробных многофакторных планов и научиться строить на их основе многофакторные математические модели первого порядка, а также составлять алгоритмы и программы для расчетов неизвестных коэффициентов математической модели отклика, расчетного значения функции отклика, величины относительного отклонения Δ , в том числе и Δ в процентах.

Порядок подготовки к работе

1. Изучить рекомендованную литературу [1 – 3].
2. Изучить задания и методические указания к их выполнению.

Описание использованного оборудования

Лабораторный стенд и ПЭВМ.

Основные сведения

Рассматривая четырёхфакторный эксперимент при двух уровнях изменения каждого из факторов, ПФЭ 2^4 , мы увидим, что он включает в себя проведение 16 опытов и разрешает построить насыщенное уравнение регрессии, которое будет состоять из линейной части (главные линейные эффекты) и нелинейной части, в которую входят эффекты взаимодействия – парные, тройные и четверные.

$$\begin{aligned} y = & \underline{b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4} + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 \\ & + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + b_{123}x_1x_2x_3 \\ & + b_{124}x_1x_2x_4 + b_{134}x_1x_3x_4 + b_{234}x_2x_3x_4 + b_{1234}x_1x_2x_3x_4 \end{aligned} \quad (3.1)$$

В первой строчке данного уравнения записаны и подчеркнуты прямой линией составляющие, которые определяют главные линейные эффекты, а в следующих строчках – эффекты парного взаимодействия x_1x_2 и т.д., потом эффекты тройного взаимодействия $x_1x_2x_3$ и т.д., и в конце – эффект четверного взаимодействия $x_1x_2x_3x_4$.

Практика показывает, что в большинстве случаев эффекты тройного взаимодействия и более высоких порядков и во многих случаях эффекты парного взаимодействия статистически незначимы, т.е. абсолютные значения соответствующих коэффициентов математической модели меньше ошибок их определения. Таким образом, для построения достаточно точной модели необходимо определить не 2^m коэффициентов, а значительно меньше. Например, если в четырёхфакторном эксперименте доминирующими являются главные линейные части (см. уравнение 3.1 – все линейные эффекты подчеркнуты), то уравнение регрессии будет включать только пять составляющих, а число неизвестных коэффициентов k также будет равняться 5 (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5). Для их определения достаточно пяти опытов, так как каждый опыт в плане многофакторного эксперимента представляет собой уравнение. В общем случае соотношение $N \geq k$ должно выполняться.

Таким образом, число опытов N в эксперименте может быть уменьшено до величины k . Но непарное число опытов в ПФЭ m обязательно приведет к не симметрии, а значит, и к не ортогональности плана. Поэтому для построения математической модели и для сокращения числа опытов используют дробный многофакторный эксперимент ДФЭ 2^{m-q} . Он включает в себя только часть опытов полного факторного эксперимента ПФЭ m , поэтому и называется дробным факторным экспериментом ДФЭ 2^{m-q} .

Число опытов в нем определяется как $N_{ДФЭ} = 2^{m-q}$, где q – индекс дробности реплики, который показывает какую часть плана ПФЭ m мы берем: при $q = 1$ – полуреплика (1/2 плана ПФЭ m), при $q = 2$ – четверть реплики (1/4 плана ПФЭ m), при $q = 3$ – две четверти реплики (1/8 плана ПФЭ m) и т.д.

Можно показать, что число опытов в дробном факторном эксперименте (ДФЭ) связано с числом опытов в полном факторном эксперименте (ПФЭ) следующей формулой или зависимостью:

$$N_{ДФЭ} = 2^{-q} N_{ПФЭ} , \quad (3.2)$$

где q – целое положительное число, индекс дробности реплики.

При построении дробных планов возникает вопрос, каким образом из 2^m опытов полного факторного эксперимента (ПФЭ) выбрать часть 2^{m-q} опытов так, чтобы матрица плана ДФЭ была симметричной, ортогональной и нормированной. Для обеспечения указанных признаков построение ДФЭ следует выполнять по следующим правилам:

1. Матрица плана ДФЭ 2^{m-q} включает 2^{m-q} строк и $m+1$ столбец.
2. Столбцы (колонки) $x_0, x_1 \dots x_{m-q}$ заполняют по правилу заполнения матриц ПФЭ 2^m .

3. Колонки $x_{m-q+1}, x_{m-q+2} \dots x_m$ заполняют с помощью специальных соотношений, которые представляют собой произведение факторов x_1, x_2, \dots, x_{m-q} или части из них. Такие соотношения называют генерирующими.

Например, при $m = 4$ матрица ДФЭ 2^{4-1} , построенная с помощью выше указанных правил, будет иметь генерирующим соотношением $x_4 = x_1 x_2 x_3$. Соответственно $b_4 \Leftrightarrow b_{123}$.

После того, как выбрано наибольшее число множителей (в нашем случае три – x_1, x_2, x_3) при необходимости построения плана берутся соотношения с меньшим числом множителей, например, $x_1 x_2, x_1 x_3, x_2 x_3$.

Для определения смешивания оценок других эффектов используют соотношение так называемого определяющего контраста. Его получают из генерирующего соотношения путем умножения его левой и правой частей на левую часть. В нашем примере определяющий контраст получается так:

$$x_4^2 = x_1 x_2 x_3 x_4. \quad (3.3)$$

Поскольку при принятом способе кодирования $x_j = \pm 1$, то можно записать

$$1 = x_1 x_2 x_3 x_4. \quad (3.4)$$

Помножив левую и правую части определяющего контраста на какой-нибудь фактор или какое-нибудь взаимодействие факторов, получим соотношение, которое определяет эффект смешивания:

$$x_1 \cdot 1 = x_1^2 x_2 x_3 x_4 \Rightarrow x_1 = x_2 x_3 x_4 \Rightarrow b_1 \Rightarrow b_{234}; \dots \dots \dots (3.5)$$

$$x_2 \cdot x_3 \cdot 1 = x_1 x_2^2 x_3^2 x_4 \Rightarrow x_2 x_3 = x_1 x_4 \Rightarrow b_{23} \Leftrightarrow b_{14} \dots \dots \dots (3.6)$$

Коэффициенты регрессии ($b_0, b_1 \dots b_m$) определяются по той же формуле, что и в плане ПФЭ 2^m .

Порядок выполнения

Задача 3.1. Соответственно с вариантом, указанным преподавателем, записать искомую математическую модель в общем виде и выделить в ней линейную часть.

Задача 3.2. Построить план дробного факторного эксперимента с целью максимального сокращения числа опытов и нахождения неизвестных коэффициентов для линейной части математической модели.

Задача 3.3. Составить алгоритм и программу для расчета числовых значений коэффициентов математической модели, величин расчетных значений функции отклика y_{pi} , величин отклонений и относительных отклонений в процентах, $\Delta\%$ между y_{ei} и y_{pi} . Пример построения алгоритма приведен в [1, приложение 1, рис. Д 1.3].

Задача 3.4. На основе экспериментальных значений функций отклика, приведенных в приложении 1, табл. П 1.1, согласно заданному варианту в лабораторной работе № 1, вычислить коэффициенты математической модели, расчетные значения функции отклика, величины отклонений и относительных отклонений в процентах, $\Delta\%$, между значениями функций отклика y_{ei} и y_{pi} . Пример результатов расчета приведен в [1, приложение 1, пример Д 1.3].

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Математическая модель в общем виде с рассчитанными числовыми значениями коэффициентов, и результатами расчетов расчетных значений функции отклика, величин отклонений и относительных отклонений в процентах, $\Delta\%$.

3. План дробного факторного эксперимента.

Контрольные вопросы

1. Что такое дробный факторный эксперимент ДФЭ 2^{m-q} ?
2. В каких случаях целесообразно проводить ДФЭ 2^{m-q} ?

3. Какую математическую модель можно построить, используя ДФЭ?
4. Как вычислить число опытов в ДФЭ? Приведите примеры.
5. Как соотносится количество опытов в $ДФЭ^{m-q}$ с числом опытов $ДФЭ^m$?
6. Правила построения матрицы плана $ДФЭ^{m-q}$. Приведите примеры.
7. Приведите примеры генерирующих соотношений.
8. Что такое реплика, ее индекс дробности и разрешающая способность?
9. Расчет коэффициентов математической модели на основе $ДФЭ^{m-q}$.
10. Объясните алгоритм и программу обработки $ДФЭ^{m-q}$.

4. Лабораторная работа № 4

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВТОРОГО ПОРЯДКА НА ОСНОВЕ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ЦЕНТРАЛЬНО-КОМПОЗИЦИОННЫХ ПЛАНОВ (ОЦКП)

Цель работы – ознакомление с ортогональными планами второго порядка и обретение практических навыков в построении математических моделей второго порядка на основе ортогональных центрально-композиционных планов (ОЦКП) второго порядка с помощью ПЭВМ.

Порядок подготовки к работе

Изучить:

- 1) рекомендованную литературу [1 – 3] ;
- 2) методические указания к выполнению лабораторной работы.

Перечень используемого оборудования

Лабораторный стенд и ПЭВМ 80586.

Основные сведения

Уравнения регрессии, которые учитывают эффекты взаимодействия, являются нелинейными. Но если зафиксировать все факторы, кроме какого-нибудь одного из них, на определенных уровнях, то полученная таким образом однофакторная зависимость будет линейной. Другими словами, уравнения с учетом эффектов взаимодействия являются линейными в

сечениях. В ряде случаев такими уравнениями нельзя с приемлемой точностью описать реальную поверхность функции отклика. Например, это может быть в области минимума или максимума функции отклика. В таких случаях уравнения в сечениях должны быть нелинейными. Получить такие нелинейности можно путем введения в уравнение регрессии квадратов факторов x_j^2 , где $j = 1, 2, \dots, m$.

Планирование эксперимента с целью получения математической модели в виде квадратичного полинома называют планированием второго порядка. Полином второго порядка включает составляющие, которые учитывают главные линейные эффекты, эффект парных взаимодействий, а также квадратичные эффекты. В общем случае он имеет такой вид:

$$\tilde{y} = \sum_{j=1}^m b_j x_j + \sum_{j=1}^m \sum_{k=j+1}^m b_{jk} x_j x_k + \sum_{j=1}^m b_{jj} x_j^2 \dots\dots\dots (4.1)$$

Первая составляющая правой части учитывает главные линейные эффекты, вторая – эффекты парного взаимодействия, третья – квадратичные эффекты. Главные линейные эффекты формально можно рассматривать как эффект взаимодействия с фиктивным фактором $x_0 = 1$. Тогда уравнение (4.1) можно записать в коротком виде

$$y = \sum_{j=0}^m \sum_{k=j}^m b_{jk} x_j x_k . \quad (4.2)$$

Например, при $m = 2$ (двухфакторный эксперимент) получим

$$\begin{aligned} y &= b_{00}x_0x_0 + b_{01}x_0x_1 + b_{02}x_0x_2 + b_{11}x_1x_1 + b_{12}x_1x_2 + b_{22}x_2x_2 = \\ &= b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Число неизвестных коэффициентов k , определяется по формуле

$$k = \frac{m^2 + 3m + 2}{2} . \quad (4.4)$$

Полный или дробный факторный эксперимент не позволяет определить коэффициенты квадратного полинома по нижеследующим причинам:

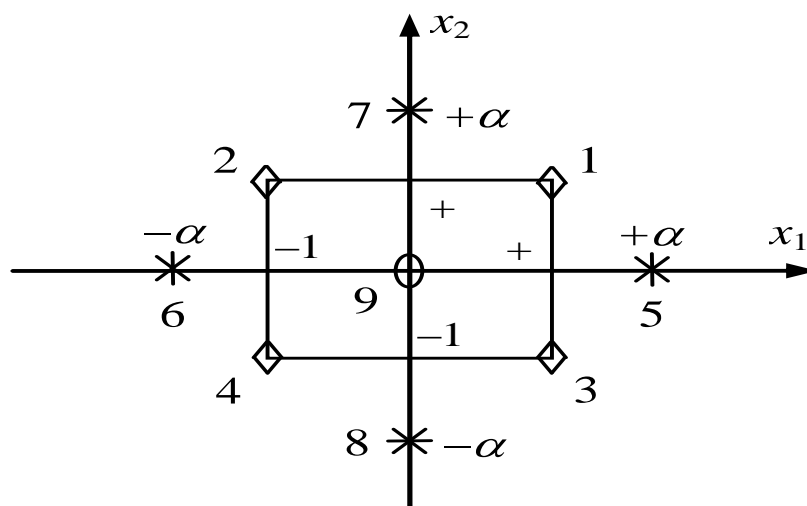
1. Два уровня изменения факторов не позволяют выявить нелинейный характер сечений поверхности отклика.
2. При $m \geq 3$ число опытов меньше числа неизвестных коэффициентов k .
3. Столбцы x_j^2 равнозначны столбцу x_0 , поэтому такой план не является симметричным и ортогональным.

При построении плана второго порядка планы ПФЭ или ДФЭ используют лишь как его составные части, а именно, как ядро этих планов, которое дополняется уровнями изменения (точками), значение координат которых выбирают из условий симметричности и ортогональности. Наибольшее распространение нашли так называемые ортогональные центрально-композиционные планы (ОЦКП) второго порядка (см. рис.4.1.)

Ядро такого плана – ПФЭ или ДФЭ – дополняют m парами симметричных точек, размещенных на координатных осях на некотором расстоянии α от центра плана (их называют «звездные точки»), а также точкой в центре плана (нулевая точка). Число α называют «звездным плечом». На рис. 4.1 изображены координаты точек состояния объекта исследования при двухфакторном эксперименте, который проводится соответственно плану ОЦКП второго порядка.

Матрица планирования такого эксперимента приведена в табл. 4.1.

Введение в план столбцов x_1^2 и x_2^2 нарушает симметричность и ортогональность матрицы, потому что их значения не могут быть отрицательными ($x_j^2 = +1$). Поэтому для учета квадратичных эффектов вводят фиктивные факторы типа $x_j^2 - \varphi$, где φ – положительное постоянное число, которое называют квадратичной поправкой. Значение поправки φ и звездного плеча α однозначно определяются исходя из условий симметричности и ортогональности матрицы условий опытов плана эксперимента для столбцов x_4 и x_5 . Таким образом, α и φ могут быть найдены путем решения системы двух уравнений.



\diamond – точки ПФЕ 2^2 , * – звездные точки, 0 – нулевая точка

Рисунок 4.1 – Координаты точек состояния объекта исследования в ОЦКП второго порядка при двух факторах.

Таблица 4.1 – План ОЦКП второго порядка при двух факторах

i	x_0	x_1	x_2	$x_3 = x_1 x_2$	$x_4 = x_1^2 - \varphi$	$x_5 = x_2^2 - \varphi$	y_{ei}
1	+1	+1	+1	+1	$1 - \varphi$	$1 - \varphi$	
2	+1	-1	+1	-1	$1 - \varphi$	$1 - \varphi$	
3	+1	+1	-1	-1	$1 - \varphi$	$1 - \varphi$	
4	+1	-1	-1	+1	$1 - \varphi$	$1 - \varphi$	
5	+1	$+\alpha$	0	0	$\alpha^2 - \varphi$	$-\varphi$	
6	+1	$-\alpha$	0	0	$\alpha^2 - \varphi$	$-\varphi$	
7	+1	0	$+\alpha$	0	$-\varphi$	$\alpha^2 - \varphi$	
8	+1	0	$-\alpha$	0	$-\varphi$	$\alpha^2 - \varphi$	
9	+1	0	0	0	$-\varphi$	$-\varphi$	

Построение уравнения симметричности сводится к приравнению нулю суммы элементов столбцов x_4 или x_5

$$4(1 - \varphi) + 2(\alpha^2 - \varphi) - 3\varphi = 0. \quad (4.5)$$

Построение уравнения ортогональности сводится к приравниванию нулю суммы попарных произведений элементов столбцов x_4 и x_5

$$4(1-\varphi)^2 - 4\varphi(\alpha^2 - \varphi) + \varphi^2 = 0. \quad (4.6)$$

Решение системы уравнений (4.5) и (4.6) дает такие результаты:

$$\alpha = 1, \quad \varphi = \frac{2}{3} = 0,667.$$

Аналогичным образом может быть построена система двух уравнений в общем виде для m факторов с ядром ПФЭ 2^{m-q} или ДФЭ 2^{m-q} и рассчитаны соответствующие значения α и φ , которые приведены в [1, табл.3.11, с.78]

Так как построенная при таких условиях матрица симметрична и ортогональна, определение коэффициентов уравнения регрессии второго порядка проводится по приведенной ранее общей формуле

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N y_{ei} x_{ji}}{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2}. \quad (4.7)$$

Уравнение регрессии второго порядка с учетом квадратичных эффектов для $m = 2$ записывается таким образом:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} (x_1^2 - \varphi) + b_{22} (x_2^2 - \varphi) \quad (4.8)$$

или в общем виде

$$y = \sum_{j=0}^m b_j x_j + \sum_{j=1}^m \sum_{k=j+1}^m b_{jk} x_{jk} + \sum_{j=1}^m b_{jj} (x_j^2 - \varphi). \quad (4.9)$$

Порядок выполнения

Задача 4.1. Соответственно заданному преподавателем варианту записать математическую модель второго порядка в общем виде и построить план ОЦКП для нахождения коэффициентов регрессии.

Задача 4.2. Определить коэффициенты математической модели второго порядка в общем виде.

Задача 4.3. Составить алгоритм и программу для математической обработки результатов эксперимента: определения коэффициентов модели, расчетных значений функции отклика, величин отклонений и относительных отклонений в процентах, $\Delta\%$, между функциями отклика, y_{ei} и y_{pi} .

Пример построения алгоритма приведен в [1, приложение 1, рис. Д 1.4]).

Задача 4.4. На основе экспериментальных значений функций отклика, приведенных в приложении 1, табл. П 1.1 и согласно заданному преподавателем варианту в лабораторной работе 1, вычислить коэффициенты полинома, расчетные значения функции отклика, отклонения между функциями отклика y_{ei} и y_{pi} и относительные отклонения в процентах, $\Delta\%$.

Пример результатов расчета приведен в [1, приложение 1, пример Д 1.4].

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Уравнение регрессии второго порядка в общем виде.
3. План ОЦКП второго порядка.
4. Алгоритм математической обработки результатов эксперимента с описанием структуры и правил его использования.
5. Результаты расчетов коэффициентов МММ, расчетные значения функций отклика y_{pi} , величины отклонений Δ и $\Delta\%$.
5. Построенная математическая модель второго порядка с описанием структуры и её анализом.

Контрольные вопросы

1. В каких случаях целесообразно использовать уравнение регрессии или полином второго порядка?

2. Какие требования предъявляются и должны выполняться при построении ортогональных планов?
3. Что такое планирование эксперимента второго порядка?
4. Приведите примеры математической модели (полинома) второго порядка для $m = 2; 3$ и дайте характеристику ее составных элементов.
5. Что такое «звездное плечо» α и квадратичная поправка φ и как определяют их числовые значения? Приведите примеры для $m = 3, 4, 7$.
6. Объясните алгоритм расчета коэффициентов математической модели второго порядка и математической обработки планов ОЦКП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грищук Ю. С. Основи наукових досліджень [Текст]: навч. посібник. / Ю. С. Грищук. – Харків: НТУ «ХП», 2008. – 232 с.
2. Грищук Ю. С. Определение оптимальных параметров плавких элементов быстродействующих предохранителей методом математической теории планирования эксперимента // Вестник ХПИ, №166, Электромашиностроение и автоматизация промышленных предприятий. – Харьков: Высш. шк., 1980. – Вып. 5. – С. 33-37.
3. Ивоботенко Б. А. Планирование эксперимента в электромеханике / Б. А. Ивоботенко Н. Ф. Ильинский, И. П. Копылов. – М.: Энергия, 1975. – 184 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица П 1.1. Данные для построения математических моделей функций отклика и обработки результатов многофакторных экспериментов

№ опыта	$I_{огр}$ кА	$I_{пл,}$ кА	$U_{п,}$ В	$U_{ср,}$ В	$t_{пл,}$ мс	$t_{откл,}$ мс	$W_{п,}$ А ² с	$l_{г,}$ мм
1	3,06	2,76	563,4	806,5	2,34	3,45	12658,0	38,36
	3,15	2,84	574,4	830,0	2,41	3,52	12785,1	39,66
	2,49	2,65	509,1	634,5	1,79	2,90	12704,9	47,67
2	2,71	2,57	1041,9	633,7	1,35	2,46	5805,7	39,84
	2,77	2,63	1032,6	649,4	1,38	2,49	5940,5	40,71
	2,47	2,46	721,5	672,9	1,02	2,13	4435,8	27,75
3	4,02	3,85	654,5	444,4	1,88	2,99	13826,7	20,78
	3,98	3,81	649,3	440,4	1,86	2,97	13435,6	20,60
	2,95	3,14	442,2	303,2	1,89	3,00	11854,7	14,72
4	1,99	1,98	448,7	355,4	2,54	3,65	5295,1	25,01
	1,97	1,95	451,5	350,1	2,50	3,61	5246,0	24,68
	1,68	1,62	497,8	365,5	2,28	3,39	3907,9	15,71
5	2,26	1,96	563,2	379,9	0,98	2,09	2575,8	24,14
	2,25	1,95	567,1	378,8	0,98	2,09	2549,8	24,08
	2,03	2,39	546,7	330,3	1,04	2,15	2665,3	13,28
6	1,26	1,05	622,3	349,1	1,45	2,56	1230,2	19,86
	1,30	1,08	624,7	360,1	1,49	2,60	1242,1	20,56
	1,04	0,87	542,9	325,8	1,29	2,40	770,7	25,58
7	1,70	1,63	541,0	386,7	2,10	3,21	10775,7	71,01
	1,72	1,65	547,6	391,0	2,12	3,23	10678,3	71,02
	1,68	1,67	309,4	413,3	1,40	2,51	10982,0	50,17
8	1,72	1,61	540,4	396,8	0,86	1,97	1957,3	23,72
	1,77	1,66	546,8	408,2	0,89	1,97	1977,9	24,50
	1,46	1,37	508,8	335,0	0,65	1,76	1686,7	30,08
9	3,72	3,64	531,3	322,9	1,70	2,81	15444,7	19,52
	3,79	3,72	535,2	330,4	1,74	2,85	15365,3	19,90
	2,99	2,84	613,5	363,7	1,72	2,83	8868,0	11,28
10	1,97	1,74	605,7	400,8	2,19	3,30	5232,3	28,64
	2,00	1,77	613,9	407,5	2,23	3,34	5182,4	29,17
	0,58	1,43	427,4	241,7	2,11	3,22	4555,3	25,29

Продолжение приложения 1, табл. П 1.1

11	3,00	2,88	622,5	479,2	3,76	4,87	29930,2	31,93
	2,89	2,77	626,1	461,4	3,63	4,74	30583,3	30,61
	3,11	3,05	299,4	457,4	2,50	3,61	37448,4	41,26
12	3,05	2,79	393,9	430,0	1,45	2,56	13799,6	36,77
	3,15	2,89	406,6	440,5	1,50	2,61	13919,6	37,91
	2,50	2,42	465,5	370,6	1,25	2,36	8304,8	23,11
13	1,82	1,68	614,7	388,1	2,38	3,49	7237,1	41,61
	1,88	1,74	621,6	402,6	2,45	3,56	7305,1	43,11
	1,70	1,68	509,7	484,2	1,47	2,58	5860,9	47,28
14	1,73	1,62	689,6	527,5	0,70	1,81	1702,5	32,98
	1,78	1,67	695,6	541,6	0,72	1,83	1718,2	33,87
	1,59	1,45	612,8	433,9	0,68	1,79	1313,3	28,25
15	2,37	2,30	311,9	234,8	1,05	2,16	4377,2	23,62
	2,36	2,29	313,5	233,9	1,04	2,15	4339,0	23,53
	2,02	1,86	322,6	227,3	1,06	2,17	2767,8	13,75
16	1,23	1,15	276,2	235,5	1,43	2,54	1838,8	18,96
	1,27	1,18	270,5	242,4	1,47	2,58	2789,1	19,55
	1,10	0,97	350,2	191,1	1,30	2,41	463,1	18,49
17	1,75	1,73	798,9	477,4	6,42	7,53	12350,8	29,78
	1,82	1,80	809,6	495,4	6,65	7,76	12418,1	30,80
	1,68	1,72	536,5	521,2	5,83	6,94	8870,0	23,72
18	2,19	0,01	721,4	555,5	2,65	3,76	4090,0	17,92
	2,24	1,85	729,1	568,9	2,71	3,82	4030,5	18,43
	1,78	0,02	595,2	414,6	1,99	2,10	3617,5	22,16
19	3,07	3,09	613,1	453,7	3,80	4,91	26327,2	42,77
	3,16	3,19	623,3	468,4	3,93	5,04	26119,0	44,11
	2,32	2,12	560,5	382,9	3,52	4,63	16937,7	31,92
20	1,59	1,50	727,0	623,6	5,14	6,25	9390,8	29,12
	1,63	1,54	735,5	636,9	5,26	6,37	9268,7	29,74
	1,28	1,31	784,5	395,5	5,06	6,17	7491,5	19,14
21	1,81	1,79	863,5	589,7	2,08	3,19	4067,6	28,83
	1,85	1,82	895,1	602,4	2,13	3,24	4162,1	29,58
	1,30	1,19	617,4	397,9	1,79	2,90	1898,3	36,09
22	0,88	0,84	816,6	683,2	2,81	3,92	1282,6	42,20
	0,90	0,86	866,9	695,7	2,86	3,97	1292,5	42,91
	0,78	0,69	713,5	499,1	2,67	3,78	1165,9	21,39

Окончание приложения 1, табл. П 1.1

23	1,26	1,27	421,4	310,7	4,17	5,28	3798,1	23,24
	1,28	1,29	437,9	315,2	4,23	5,34	3769,4	23,65
	1,06	1,04	436,7	274,1	3,60	4,71	3214,4	36,21
24	1,22	1,16	430,5	234,7	1,46	2,57	1130,4	24,05
	1,24	1,19	438,1	239,8	1,49	2,60	1119,6	24,49
	1,14	1,10	277,4	257,5	0,94	2,05	1332,0	14,46
25	3,21	3,14	895,0	718,8	3,74	4,85	19406,5	36,65
	3,28	3,21	926,9	732,8	3,82	4,93	19002,9	37,48
	2,21	2,05	575,1	384,4	3,69	4,80	16640,6	34,18
26	1,52	1,47	584,9	516,6	5,14	6,25	11919,0	53,85
	1,54	1,49	596,9	524,9	5,22	6,33	11682,3	54,59
	1,29	1,24	615,1	527,5	4,87	5,98	7274,7	30,47
27	2,37	2,32	396,1	410,1	7,08	8,19	22996,5	29,74
	2,41	2,36	398,2	417,6	7,21	8,32	23211,2	30,25
	1,82	1,92	501,7	357,2	7,01	8,12	12367,3	20,71
28	2,05	2,05	456,0	326,9	2,70	3,81	5499,7	16,65
	2,07	2,07	473,5	330,5	2,72	3,83	5481	16,85
	2,00	2,02	267,5	317,6	1,77	2,88	6841,4	21,69
29	1,20	1,18	516,1	369,3	3,49	4,60	3070,4	29,38
	1,23	1,20	544,0	376,9	3,56	4,67	3064,8	29,99
	1,17	1,07	487,9	333,8	3,89	5,00	2375,8	28,23
30	1,33	1,21	458,2	301,1	1,42	2,53	1128,3	18,35
	1,37	1,25	463,4	311,1	1,47	2,58	1135,7	18,95
	1,21	1,14	374,4	392,8	0,87	1,98	1486,0	23,18
31	1,78	1,75	479,1	446,5	1,63	2,74	7939,7	41,23
	1,84	1,80	469,8	460,5	1,70	2,81	8183,1	42,73
	1,48	1,25	449,1	454,0	2,67	3,78	5351,1	41,14
32	0,93	0,89	509,0	437,0	2,86	3,97	4139,1	40,31
	0,96	0,92	522,4	450,6	2,96	4,07	4205,4	41,44
	0,80	0,75	465,6	354,4	2,67	3,78	2707,5	21,16

Примечание 1: В таблице П 1.1 приведены экспериментальные значения функций отклика y_{ei} для 32-х опытов (результаты опытов с 33-го по 47-й приведены в [1, Приложение 3, табл. Д 3.1, с. 214-216], которые

рекомендуется использовать при выполнении лабораторных работ №1 – № 4 для расчёта коэффициентов многофакторных математических моделей 1-го и 2-го порядков, величин расчетных значений функций отклика, величин относительных отклонений Δ , между экспериментальными – y_{ei} и расчётными – y_{pi} значениями функций отклика и в процентах, Δ %.

В таблице П 1.1 приняты следующие обозначения:

$I_{огр}$ – ток ограничения, кА;

$I_{пл}$ – ток плавления, кА;

$U_{п}$ – перенапряжение, В;

$U_{ср}$ – среднеинтегральное напряжение на дуге, В ;

$t_{пл}$ – время плавления узких перешейков плавкого элемента, мс ;

$t_{откл}$ – время отключения тока короткого замыкания предохранителем, мс;

$W_{п}$ –интеграл Джоуля (интеграл квадрата тока за время отключения), $A^2 \cdot c$;

$l_{г}$ – длина выгорания плавкого элемента, мм.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Описание принятых обозначений в алгоритмах и примерах

В приложении 3, примере П 2.1 и наведенных в [1, приложении 1] алгоритмах (рис. Д1.1-Д 1.5), и примерах (П1.1-П1.5) приняты такие обозначения:

(i) – индекс указывающий номер опыта в плане эксперимента;

$ye(i)$ – экспериментальные значения функции отклика (в алгоритме $y_3(i)$);

$yr(i)$ – расчетные значения функции отклика (в алгоритме $y_p(i)$);

$dely(i)$ – отклонение между экспериментальными и расчетными значениями функции отклика (в алгоритме $\Delta y(i)$);

$eI(i)$, % – относительное отклонение между экспериментальными и расчетными значениями функции отклика, в процентах (в алгоритме $\varepsilon(i)$);

$b(j)$ – коэффициенты математической модели; j – индекс коэффициента.

В [1], на рис. Д 1.1-Д 1.4, приведены алгоритмы и примеры расчета численных значений указанных выше величин (П1.1-П1.4).

Алгоритм обработки плана ПФЭ 2^m ([1], рис. П 1.1) предусматривает последовательное выполнение следующих операций: 1) ввод числа факторов m ; 2) расчет количества опытов n ; 3) формирование нулевого столбца $x(i0) = +1$; 4) ввод среднеарифметических экспериментальных значений функций отклика $y_3(i)$; 5) расчет чередования знаков; 6) занесение $+1$ в столбцы $x(ij)$; 7) занесение -1 в столбцы $x(ij)$; 8) определение коэффициентов математической модели первого порядка $b(j)$; 9) определение расчетных значений функций отклика $y_p(i)$; 10) расчет отклонений между экспериментальными и расчетными значениями функций отклика $\Delta y(i)$; 11) расчет относительных отклонений функций отклика в процентах $\varepsilon(i)$. В алгоритмах обработки планов с нелинейностями (([1], рис. П 1.2), ДФЭ 2^{m-q} ([1], рис. П 1.3), ОЦКП ([1], рис. П 1.4), ДОЦКП ([1], рис. П 1.5)) дополнительно предусматриваются расчеты индексов дробности планов q , генерирующих соотношений, звездных плеч $+\alpha$ и $-\alpha$, поправок φ и занесение их значений в соответствующие столбцы, а также определение коэффициентов математических моделей при нелинейностях и квадратичных членах.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Пример П 2.1– Результаты расчёта коэффициентов математической модели первого порядка и обработки плана ПФЭ^{2m} для пяти факторов

\j i	0	1	2	3	4	5	ye(i)	yr(i)	dely(i)	e1(i),%
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,340	2,638	0,298	12,740
2	1,00	-1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,250	1,878	0,628	50,250
3	1,00	1,00	-1,00	1,00	1,00	1,00	1,880	2,838	0,958	50,964
4	1,00	-1,00	-1,00	1,00	1,00	1,00	2,440	2,078	0,362	14,831
5	1,00	1,00	1,00	-1,00	1,00	1,00	1,000	1,202	0,202	20,188
6	1,00	-1,00	1,00	-1,00	1,00	1,00	1,410	0,442	0,968	68,661
7	1,00	1,00	-1,00	-1,00	1,00	1,00	1,870	1,402	0,468	25,033
8	1,00	-1,00	-1,00	-1,00	1,00	1,00	0,800	0,642	0,158	19,766
9	1,00	1,00	1,00	1,00	-1,00	1,00	1,720	2,719	0,999	58,103
10	1,00	-1,00	1,00	1,00	-1,00	1,00	2,190	1,959	0,231	10,531
11	1,00	1,00	-1,00	1,00	-1,00	1,00	3,290	2,919	0,371	11,265
12	1,00	-1,00	-1,00	1,00	-1,00	1,00	1,450	2,159	0,709	48,922
13	1,00	1,00	1,00	-1,00	-1,00	1,00	2,100	1,283	0,817	38,899
14	1,00	-1,00	1,00	-1,00	-1,00	1,00	0,700	0,523	0,177	25,268
15	1,00	1,00	-1,00	-1,00	-1,00	1,00	1,050	1,483	0,433	41,250
16	1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	1,00	1,400	0,723	0,677	48,348
17	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	-1,00	6,150	4,458	1,692	27,510
18	1,00	-1,00	1,00	1,00	1,00	-1,00	2,650	3,698	1,048	39,552
19	1,00	1,00	-1,00	1,00	1,00	-1,00	3,800	4,658	0,858	22,582
20	1,00	-1,00	-1,00	1,00	1,00	-1,00	5,150	3,898	1,252	24,308
21	1,00	1,00	1,00	-1,00	1,00	-1,00	1,990	3,022	1,032	51,853
22	1,00	-1,00	1,00	-1,00	1,00	-1,00	2,780	2,262	0,518	18,638
23	1,00	1,00	-1,00	-1,00	1,00	-1,00	4,000	3,222	0,778	19,453
24	1,00	-1,00	-1,00	-1,00	1,00	-1,00	1,290	2,462	1,172	90,843
25	1,00	1,00	1,00	1,00	-1,00	-1,00	3,750	4,539	0,789	21,050
26	1,00	-1,00	1,00	1,00	-1,00	-1,00	5,080	3,779	1,301	25,603
27	1,00	1,00	-1,00	1,00	-1,00	-1,00	7,100	4,739	2,361	33,248
28	1,00	-1,00	-1,00	1,00	-1,00	-1,00	2,700	3,979	1,279	47,384
29	1,00	1,00	1,00	-1,00	-1,00	-1,00	3,490	3,103	0,387	11,085
30	1,00	-1,00	1,00	-1,00	-1,00	-1,00	1,250	2,343	1,093	87,450
31	1,00	1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	2,000	3,303	1,303	65,156
32	1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	2,830	2,543	0,287	10,137

Значения коэффициентов полинома $b(j), j = 0...5$

$b(0) = 2,59063$

$b(1) = 0,38000$

$b(2) = -0,10000$

$b(3) = 0,71812$

$b(4) = -0,04062$

$b(5) = -0,91000$

СОДЕРЖАНИЕ

Вступление.....	3
1. Лабораторная работа 1. Построение плана многофакторного эксперимента ПФЭ 2^m и математической модели первого порядка.....	4
2. Лабораторная работа 2. Построение планов и математических моделей первого порядка с нелинейностями.....	11
3. Лабораторная работа 3. Построение математических моделей на основе дробных планов ДФЭ 2^{m-q}	14
4. Лабораторная работа 4. Построение математических моделей второго порядка на основе ортогональных центрально-композиционных планов (ОЦКП).....	18
Список литературы.....	24
Приложения.....	25
Приложение 1. Таблица П 1.1. Данные для построения математических моделей функций отклика и обработки результатов многофакторных экспериментов.....	25
Приложение 2. Описание принятых обозначений в алгоритмах и примерах	29
Приложение 3. Пример П 2.1 – Результаты расчёта коэффициентов математической модели первого порядка и обработки плана ПФЭ 2^m для пяти факторов.....	30

Навчальне видання

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу “Основи наукових досліджень” для студентів спеціальності 141 “Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка”, спеціалізацій 141.07 “Електричні апарати” та 141.08 “Електропобутова техніка” усіх форм навчання, в тому числі для іноземних студентів.

Російською мовою

Укладач ГРИЩУК Юрій Степанович

Відповідальний за випуск Клименко Б. В

Роботу рекомендував до видання Воїнов В. В

В авторській редакції

План 2018 р., поз. 79

Підп. до друку 27. 07. 2018 р. Формат 60х84 1/16. Папір офсетний.

Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк.1,6

Наклад 50 прим. Зам. № 1121. Ціна договірна

Видавничий центр НТУ “ХПІ”. 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 27. 08. 2017 р.

Надруковано ТОВ “Золоті сторінки”, 61002, Харків, вул. Маршала Бажанова, 28